Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 4, 2022, p. 559-574

Numerical Simulation of the Performance and Emission of a Diesel Engine with Diesel-biodiesel Mixtures

S. R. Mousavi Seyedi[1*], S. M. R. Miri[2]

1- Associate Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2- PhD Student, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: mousavi22@sanru.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.69149.1023

Received: 27-02-2021 Revised: 21-06-2021 Accepted: 30-06-2021 Available Online: 03-07-2021	**How to cite this article:** Mousavi Seyedi, S. R., & Miri, S. M. R. (2022). Numerical Simulation of the Performance and Emission of a Diesel Engine with Diesel-biodiesel Mixtures. *Journal of Agricultural Machinery*, *12*(4), 559-574. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.69149.1023

Introduction

Increasing industrialization, growing energy demand, limited reserves of fossil fuels, and increasing environmental pollution have jointly necessitated for exploration of a substitute for conventional liquid fuels. Vegetable oils can be used as alternatives to petroleum fuels for engine operation. These oils are mixtures of free-fatty acid molecules to contain carbon, hydrogen, and oxygen atoms. The ability to simulate the process of converting chemical energy to heat, energy users of computational fluid dynamics software in the design, analysis, and optimization of high-tech tools. Also, simulation saves time and reduces costs, workforce, and the space required.

Materials and Methods

In this research, a one-dimensional computational fluid dynamics solution with GT-Power software was used to simulate a four-cylinder, four-stroke, direct injection diesel engine to study the performance and exhaust emissions characteristics with different speeds and blends at full load. The engine speeds were chosen to be 1100 to 1400 rpm at an interval of 100 rpm. Also, fuel blends such as diesel (as a base), B5, and B10 biodiesel were selected for engine testing. To model a engine, we should have the dimensions of the engine, input air collection, output gases collection, the amount of sprinkled fuel, valves properties, combustion, and some of the estimates corresponding to the cylinder's thermodynamic parameters when opening the output and input gate and to exchange the heat inside the cylinder as the input data. The model mainly consisted of an air cleaner, intake valve, exhaust valve, intake and exhaust port, injection nozzle, engine cylinder, and engine. Engine cylinder's intake and exhaust ports are modeled geometrically with pipes. Before this investigation was carried out, a validation model for evaluation was done by experimental and simulation data. The validation results showed that the software model error is acceptable.

Results and Discussion

The engine performance and emissions were evaluated in terms of engine torque, specific fuel consumption, NOx, and CO emission at different engine speeds and fuels at full load. The results showed that with increasing the engine speeds, torque increased. On the other hand, the maximum engine torque for the diesel engine is slightly lower than the biodiesel-blended that increased by 4.4% because of the higher density and viscosity of biodiesel than diesel. Specific Fuel Consumption (SFC) is a measure of the fuel efficiency of any prime mover that burns fuel and produces rotation, or shaft, power. The results indicated that by increasing engine speeds, the SFC increased. A fuel with a lower heating value should be injected with more mass into the engine. This will increase the SFC. So, the maximum engine SFC for the diesel engine is more than the biodiesel-blended that decreased by 4.45% because of better fuel combustion and more power generation of biodiesel than diesel. The only nitrogen oxide that can be formed in an engine combustion temperature is nitrogen monoxide (NO). This pollutant factor can be converted to nitrogen dioxide (NO2) over the time of exhaust gas. The results showed that with increasing the engine speeds, the NOX emissions decrease steadily and then increases, which is due to the high temperature in the cylinder. The viscosity and density of fuels have an effect on NOX emission, and because of the larger droplets of the fuel, it released NOX. The highest NOx emissions belong B10 biodiesel in 1400 rpm, due to the high oxygen content of this fuel and the lowest NOx emissions belong B10 biodiesel in

1300 rpm, due to the low density of the fuel compared to diesel. CO is a colorless and odorless gas, whose even very low concentrations are dangerous for humans and animals. The results showed that with increasing the engine speeds, the CO emission decreased and the minimum CO emission for diesel engine is more than the biodiesel-blended that decreased by 37.61% because of excess oxygen availability and complete combustion in biodiesel than diesel.

Conclusion

The results of this study showed that the B10 blend in high engine speeds, generally had the best performance and emissions characteristics among the three fuels used in this study. Also, this investigation will assist in the development of WCO biodiesel as a viable sustainable fuel source through the use of a CFD model, optimized engine configuration, and technical report.

Keywords: Engine characteristics, GT-Power Software, Thermodynamic model, Waste cooking oil

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۷۴-۵۵۹

شبیه‌سازی عددی عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با استفاده از مخلوط سوخت دیزل- بیودیزل

سید رضا موسوی سیدی[1]*، سید محمدرضا میری[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

چکیده

در میان سوخت‌های جایگزین، سوخت بیودیزل به‌عنوان یک گزینه مناسب برای موتور دیزل محسوب می‌شود. در این مطالعه، سوخت بیودیزل از روغن‌های پسماند آشپزخانه به روش ترانس‌استریفیکاسیون تولید شد. بیودیزل تولیدی در نسبت‌های ۵ و ۱۰ درصد حجمی با سوخت دیزل مخلوط و بر روی موتور دیزل چهار سیلندر چهار زمانه تزریق مستقیم در سرعت‌های ۱۱۰۰ rpm تا ۱۴۰۰ rpm با گام ۱۰۰ rpm تحت بار کامل در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر آزمایش شد. سپس جنبه آزمایشگاهی با مطالعه شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار GT-Power اعتبارسنجی شد. نتایج نشان می‌دهد توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد که حداکثر خطا در گشتاور ۶/۳ درصد، مصرف سوخت ویژه ۴/۸ درصد و در آلاینده‌های NOx و CO ۵/۶ درصد یافت شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش سرعت موتور و افزایش درصد سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل خالص برای بیودیزل مخلوط B10، گشتاور موتور به میزان ۴/۴ درصد افزایش و مصرف سوخت ویژه به میزان ۴/۴۵ درصد کاهش یافت. از طرفی در مقایسه با سوخت دیزل، آلاینده NOx، ۱/۸ درصد افزایش و آلاینده CO، ۳۷/۶۷ درصد کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داد که سوخت B10 عملکرد بهتری را ارائه می‌دهد و نیز میزان آلایندگی موتور را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. همچنین فرایند شبیه‌سازی به دلیل کاهش هزینه‌ها و افزایش سرعت محاسبات می‌تواند نسبت به روش‌های آزمایشگاهی هزینه تحقیق را کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: روغن پسماند آشپزخانه، مدل ترمودینامیکی، نرم‌افزار GT-Power، ویژگی‌های موتور

مقدمه

فرایند صنعتی شدن، ذخایر محدود سوخت‌های فسیلی همزمان با نیاز روزافزون انرژی و افزایش آلودگی محیط‌زیست جستجو برای یافتن جایگزین سوخت‌های دیزل معمولی را ضروری ساخته است. گزارش شده است می‌توان از روغن‌های گیاهی به‌عنوان سوخت‌های جایگزین استفاده نمود (Al-Dawody, Jazie, & Abdulkadhim Abbas, 2019).

بررسی‌های انجام شده در منابع مختلف نشان می‌دهد که تلاش چندانی برای استفاده از بیودیزل حاصل از منابع غیرخوراکی جهت جایگزینی سوخت دیزلی صورت نگرفته است. روغن‌های پسماند آشپزخانه به دلیل ارزان‌تر بودن نسبت به روغن‌های گیاهی و کاهش قابل توجه در قیمت بیودیزل تولیدی، می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت دیزل باشد. چنین روغن‌هایی خاصیت سوخت قابل قبولی داشته و انرژی گرمایی آن‌ها تقریباً ۱۰ درصد کمتر از سوخت دیزل معمولی می‌باشد (Al-Dawody, 2017).

موتورهای احتراق تراکمی به دلیل بازده بالاتر نسبت به موتورهای احتراق جرقه‌ای، بیشترین استفاده را در وسایل حمل و نقل سنگین دارند. معمولاً آزمایش‌های تجربی مبنای بهینه‌سازی طراحی موتورهای احتراق داخلی در ارتباط با انواع سوخت‌های جایگزین از جمله بیودیزل را تشکیل می‌دهد که با صرف هزینه‌های بالا به انجام می‌رسد (Menacer & Bouchetara, 2014).

توانایی شبیه‌سازی فرآیند تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی گرمایی، کاربران نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی را در طراحی، تحلیل و بهینه‌سازی ابزارهای با تکنولوژی بالا یاری می‌رساند. همچنین شبیه‌سازی باعث کاهش پارامترهایی نظیر هزینه، نیروی کار، وقت و فضای مورد نیاز می‌شود. شبیه‌سازی موتور به‌صورت مدل‌های صفربعدی[3]، شبه‌بعدی[4]، چند منطقه‌ای[5] و چندبعدی[6] تقسیم بندی می‌شوند. مدل صفر بعدی توانایی پیش‌بینی

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mousavi22@sanru.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.69149.1023

3- Zero dimensional
4- Quasi dimensional
5- Multi zone
6- Multi dimensional

پارامترهای عملکردی موتور را دارا می‌باشد، اما در پیش‌بینی دقیق آلاینده‌ها از دقت مناسبی برخوردار نمی‌باشد. اخیراً روند شبیه‌سازی موتورهای احتراق تراکمی به دلیل دقت بالاتر به سمت مدل‌های چندبعدی نسبت به مدل صفربعدی متمایل شده است. با این حال نیاز به داده‌های ورودی تجربی دقیق و توان محاسباتی قابل‌توجه برای حل مدل چندبعدی، به‌عنوان عیب و چالشی مهم می‌باشد (Nabi & Rasul, 2018).

در نتیجه با در نظر گرفتن معایب مدل‌های صفربعدی و چندبعدی، از نرم‌افزار GT-Power بر پایه مدل یک‌بعدی برای شبیه‌سازی موتور دیزل در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. GT-Power یکی از ساده‌ترین ابزارها برای پیش‌بینی ویژگی‌های احتراق، عملکرد و آلایندگی موتور می‌باشند. همچنین برای تجزیه و تحلیل و رسم داده‌های مختلف نیز می‌توان از نرم‌افزار پساپردازش استفاده نمود (Nabi & Rasul, 2019).

تحقیقات مختلفی در زمینه بررسی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور با استفاده از مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل به‌صورت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی انجام شده است.

در تحقیقی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی سوخت بیودیزل برگ سبز بومی استرالیا با شرایط ۵ و ۱۰ درصد حجمی و دیزل خالص روی یک موتور دیزل چهار سیلندر در سرعت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی AVL Fire مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. در نتیجه توافق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی با تغییرات ۴/۴ درصد پیدا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در شرایط عملیاتی استاندارد، آلاینده‌های موتور در مخلوط B10 کاهش قابل توجهی به میزان ۱۸ درصد نسبت به سوخت دیزل داشت. همچنین بهینه‌سازی مدل از طریق تنظیم زمان تزریق و میزان فشرده‌سازی نشان داد که مخلوط B10 عملکرد بهتری در مقایسه با سوخت دیزل و B5 داشته است (Hasan, Rahman, & Kadirgama, 2015).

ویژگی‌های عملکرد و آلاینده‌های خروجی یک موتور دیزل تک سیلندر هوا خنک در سرعت‌های ۱۸۰۰ rpm تا ۳۰۰۰ rpm با گام ۴۰۰ rpm تحت بارهای ۷۵ و ۱۰۰ درصد با استفاده از مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل روغن کلزا با نسبت‌های حجمی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد بیودیزل توسط محققانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که سوخت B10 در سرعت ۱۸۰۰ rpm، دارای بیشترین میزان گشتاور و کمترین میزان مصرف سوخت ویژه بود. همچنین در شرایط ۷۵ درصد بار بیشینه ، سوخت B20 در سرعت ۱۸۰۰ rpm، دارای بیشترین میزان آلاینده NOx و CO و سوخت B10 در سرعت ۳۰۰۰ rpm، دارای کمترین میزان آلاینده NOx و CO بود. از طرفی با افزایش بار موتور، میزان توان، گشتاور و آلایندگی افزایش اما مصرف سوخت ویژه کاهش یافت. در نهایت سوخت B10 به‌عنوان سوخت بهینه جهت بهترین عملکرد و آلایندگی موتور دیزل تک‌سیلندر انتخاب شد (Miri, Mousavi Seyedi, & Ghobadian, 2017).

در تحقیقی دیگر ویژگی‌های احتراق و آلایندگی موتور دیزل با استفاده از مخلوط دیزل و بیودیزل روغن کلزا با نسبت‌های حجمی ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد بیودیزل نسبت به سوخت دیزل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سوخت بیودیزل نسبت به دیزل، آلاینده دود در مخلوط‌های B10، B20، B50 و B100 به‌ترتیب ۴۷/۲۴ درصد، ۸۱/۰۶ درصد، ۸۲/۵۶ درصد و ۹۳/۳۶ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش درصد بیودیزل در مخلوط نسبت به دیزل، آلاینده NOx افزایش و آلاینده CO کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی نیز نشان داد که مخلوط با ۱۰ درصد بیودیزل روغن کلزا مناسب‌ترین مخلوط جهت عملکرد بهتر و کاهش آلایندگی می‌باشد (Al-Dawody, 2017).

تاثیر مخلوط‌های مختلف متیل استر روغن پسماند آشپزخانه و دیزل با نسبت‌های حجمی ۱۰، ۲۰ و ۱۰۰ درصد متیل استر روغن پسماند بر عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل تک سیلندر از لحاظ آزمایشگاهی و نظری با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی AVL Fire در سرعت ثابت و تحت بارهای مختلف توسط محققانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و توافق بسیار خوبی بین آن‌ها وجود داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش درصد متیل استر روغن پسماند در مخلوط، ماکزیمم فشار به دلیل کاهش ارزش حرارتی مخلوط نسبت به دیزل خالص کاهش یافت. از طرفی دیگر، با افزایش درصد متیل استر روغن پسماند در مخلوط، آلاینده NOx کاهش چشمگیری نسبت به دیزل خالص داشت. در نهایت مخلوط حاوی ۲۰ درصد حجمی متیل استر روغن پسماند آشپزخانه (B20) به‌عنوان بهترین سوخت معرفی شد. همچنین نتایج نشان داد نسبت‌های بیشتر از ۲۰ درصد بیودیزل باعث کاهش قابل توجهی در عملکرد موتور می‌شوند (Al-Dawody *et al.*, 2019).

در تحقیقی دیگر ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل شش سیلندر با استفاده از مخلوط بیودیزل و دیزل با نسبت‌های حجمی ۲۰، ۴۰ و ۱۰۰ درصد بیودیزل سویا از لحاظ آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی Diesel-RK در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حداکثر میزان خطا ۶ درصد برای داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در گشتاور موتور وجود دارد. از طرفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش بیودیزل مخلوط نسبت به دیزل خالص، توان، گشتاور و آلاینده دود به‌ترتیب ۳/۴۱ درصد، ۲/۲۳ درصد و ۱۷/۶۱ درصد کاهش و مصرف سوخت ویژه ۲/۴۶ درصد افزایش یافت. با توجه به نتایج، مخلوط با نسبت حجمی ۲۰ درصد بیودیزل

به‌عنوان سوخت بهینه از لحاظ عملکرد و آلایندگی انتخاب شد (Haji Heydari & Hatefi Asl, 2019).

در تحقیقی دیگر نیز ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با نسبت تراکم متغیر و با شرایط سوخت دیزل خالص، بیودیزل خالص کلزا، بیودیزل خالص ماهوا[1] و مخلوط بیودیزل کلزا و ماهوا[2] (RM) با ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد حجمی در سرعت ثابت ۱۵۰۰ rpm و بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که مخلوط RM20 (۲۰ درصد بیودیزل کلزا و ماهوا) بهترین عملکرد را داشته و نزدیک به سوخت دیزل بود. علاوه بر این، راندمان حرارتی ترمزی این مخلوط ۲/۷۹ درصد کمتر از سوخت دیزل بود. در شرایط بار کامل، میزان آلاینده‌های HC، CO و دوده با استفاده از سوخت RM20 به‌ترتیب به میزان ۲۰/۶۶، ۸/۵۶ و ۶/۹ درصد کمتر از سوخت دیزل بود. همچنین نتایج آلاینده NOx بیان‌گر افزایش ۳/۷۷ درصدی برای سوخت RM20 نسبت به سوخت دیزل بیان شد. نتایج این مطالعه تأیید کرد که می‌توان از ترکیب RM20 به‌عنوان سوخت جایگزین برای موتورهای دیزلی بدون هیچ گونه تغییراتی در موتور استفاده کرد (Saravanana, Muruganb, Sreenivasa Reddy, & Satyajeet, 2020).

در تحقیقی ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی ۵ نوع سوخت شامل متانول، اتانول، مخلوط دیزل و اتانول، بیودیزل و دکان بر موتور دیزل توربوشارژ در نسبت تراکم‌های ۱۵:۱ تا ۱۹:۱ با استفاده از نرم‌افزار GT-Power مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که توافق خوبی در حدود ۶/۱۲ درصد خطا بین داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی گشتاور و توان موتور وجود دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش نسبت تراکم، سوخت دکان نسبت به سوخت دیزل دارای توان و گشتاور بالاتری در حدود ۳/۸۶ درصد و مصرف سوخت ویژه کمتری در حدود ۳/۷۲ درصد می‌باشد. در مورد آلاینده‌ها هم با کاهش نسبت تراکم نسبت به حالت مبنا (دیزل خالص)، مقادیر CO و CO_2 با سوخت بیودیزل و دیزل دارای حداقل مقدار می‌باشد. همچنین کمترین میزان آلاینده NOx با سوخت دکان حاصل شد (Ahmadipour, Aghkhani, & Zareei, 2021).

با بررسی‌های انجام شده در منابع مختلف که خلاصه‌ای از آن‌ها در مقدمه آمده است، نتیجه‌گیری می‌شود که تاکنون تحقیقی در مورد مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی تاثیر سوخت بیودیزل روغن پسماند آشپزخانه روی پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور دیزل چهار سیلندر با مخلوط سوخت بیودیزل و دیزل در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل انجام نشده است. در واقع نوع موتور و بیودیزل استفاده شده سهم تعیین‌کننده‌ای در نتایج تحقیقات داشته است، اما نقاط مشترک با سایر مقالات که در زمینه بیودیزل می‌باشند این است که به علت ذخایر محدود، محققین به دنبال سوخت‌های جایگزین می‌گردند.

هدف اصلی مقاله، مدل‌سازی و مقایسه ویژگی‌های عملکرد و آلایندگی موتور دیزل با نتایج آزمایشگاهی مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل و دست‌یابی به مخلوط بهینه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا پسماند حاصل از روغن‌های استفاده شده در رستوران‌های مختلف جمع‌آوری شد. سپس سوخت بیودیزل در آزمایشگاه گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده مهندسی زراعی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با استفاده از این روغن‌ها و به روش ترانس‌استریفیکاسیون تولید شد. در روش ترانس‌استریفیکاسیون روغن استری شده با مخلوطی شامل متانول با مولاریته ۱ به ۱۲ نسبت به روغن و واکنشگر پتاسیم هیدروکسید به مقدار ۱ درصد وزنی روغن، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد با سرعت به‌همزنی ۶۵۰ دور بر دقیقه به مدت ۹۰ دقیقه با استفاده از همزن مغناطیسی واکنش داده شد که باعث تولید اسید چرب و صابون می‌گردد. در نتیجه با انجام مراحل جداسازی و آبشویی، فرمولاسیون سوخت بیودیزل مورد مطالعه به‌صورت $C_{55}H_{105}O_6$ به‌دست آمد. برخی از خصوصیات سوخت‌های مورد استفاده در آزمایش بر اساس استاندارد ASTM در جدول ۱ نشان داده شده است.

پس از اطمینان از ویژگی‌های کیفی سوخت دیزل و بیودیزل تولیدی، مخلوط‌های حجمی سوخت دیزل و بیودیزل با ترکیب‌های B0، B5 و B10 (B10 بیان‌گر مخلوط با ۱۰ درصد بیودیزل و ۹۰ درصد دیزل) تهیه شد. دلیل انتخاب محدوده ۰ تا ۱۰ درصد بیودیزل، شرایط ویژه موتور آزمایش می‌باشد. آزمون‌های موتور در سرعت‌های ۱۱۰۰ rpm تا ۱۴۰۰ rpm با گام ۱۰۰ rpm تحت بار ۱۰۰ درصد انجام شد. لازم به ذکر است که از هر نمونه سوخت به اندازه ۴ لیتر انتخاب شد تا آزمایش‌ها با دقت کافی و در سه تکرار انجام شود. پس از آماده‌سازی مخلوط‌ها، موتور و وسایل اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی و آلایندگی موتور برای شروع داده‌برداری در وضعیت مناسب قرار گرفتند. طرحواره شماتیکی آزمون موتور در شکل ۱ ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری گشتاور موتور از دینامومتر آبی و جهت اندازه‌گیری آلاینده‌های خروجی اگزوز از دستگاه آلاینده‌سنج HG-550 ساخت کشور کره جنوبی موجود در آزمایشگاه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر استفاده شد. پس از گرم شدن موتور و رسیدن دمای روغن آن به ۶۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت موتور در مقادیر مورد نظر تنظیم و در آن سرعت پایدار شد. سپس داده‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری پارامترهای

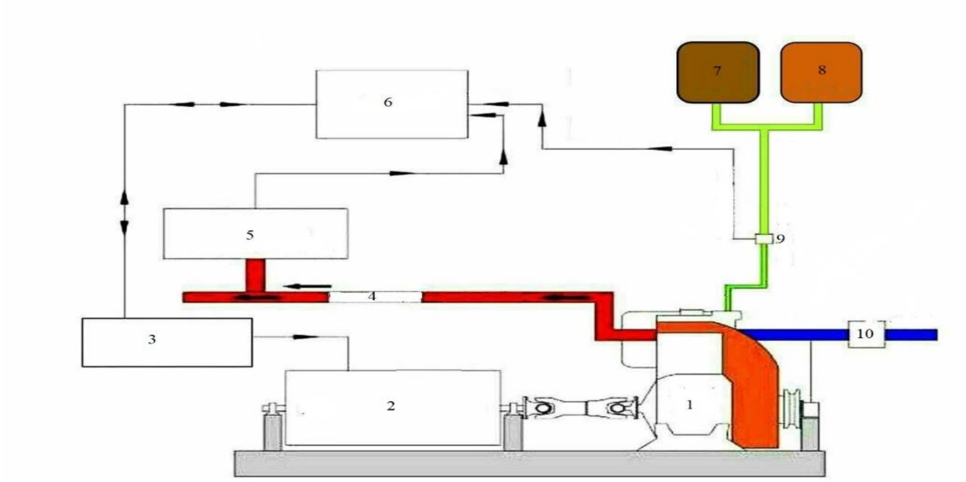
1- Mahua
2- Rapeseed and Mahua

عملکرد و آلایندگی موتور در سه تکرار جمع‌آوری شد.

جدول ۱- خصوصیات سوخت دیزل و بیودیزل مورد استفاده در آزمایش

Table 1- Properties of diesel and biodiesel fuels in tests

خصوصیات **Properties**	روش آزمون **Test method**	حدود مجاز **Allowable limit**	دیزل **Diesel**	بیودیزل ۵ درصد **B5**	بیودیزل ۱۰ درصد **B10**	بیودیزل **Biodiesel**	واحد **Unit**
نقطه اشتعال Flash Point	D92	Min 130	62	67.7	73.4	176	˚C
نقطه ابری Cloud point	D2500	Min -7	-2	-1.86	-1.62	-1	˚C
آب و رسوبات Water and sediment	D2709	Max 0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	%Vol
گرانروی سینماتیک Kinematic viscosity	D445	1.6 - 9	3.16	3.18	3.24	4.73	$mm^2.s^{-1}$
ارزش حرارتی Heating value	D240	-	42.8	40.12	39.94	36.8	$MJ.kg^{-1}$
چگالی Density	D4052	0.86 – 0.90	0.83	0.832	0.835	0.88	$g.cm^{-3}$



شکل ۱- طرحواره شماتیکی آزمون موتور: ۱- موتور دیزل ۲- دینامومتر ۳- واحد کنترل ۴- لوله اگزوز ۵- آلاینده‌سنج ۶- واحد داده‌برداری ۷- مخزن سوخت دیزل ۸- مخزن سوخت بیودیزل ۹- دستگاه اندازه‌گیری مصرف سوخت ۱۰- ورودی هوا

Fig.1. Schematic diagram of the engine test stands: 1- Diesel engine 2- Dynamometer 3- Control unit 4- Exhaust pipe 5- Emission measurement 6- Data acquisition unit 7- Diesel fuel tank 8- Biodiesel fuel tank 9- Fuel measurement system 10- Air inlet

شبیه‌سازی

داده‌های موتور برای مدل‌سازی

ورودی‌های اولیه و روابط دینامیکی حاکم بر موتور جهت شبیه‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ابعاد هندسی موتور، مجموعه هوای ورودی، مجموعه گازهای خروجی، مقدار سوخت پاشیده شده، ویژگی سوپاپ‌ها، احتراق و برخی برآوردهای متناظر برای پارامترهای ترمودینامیکی سیلندر هنگام باز کردن دریچه ورودی و خروجی و تبادل گرمای داخل سیلندر بایستی به‌عنوان داده‌های ورودی در نظر گرفته شود (Rahman, Mohammed, & Bakar, 2009).

در نهایت مدل عمدتاً شامل تصفیه‌کننده هوا، سوپاپ ورودی، سوپاپ خروجی، پورت ورودی و خروجی، نازل تزریق، سیلندر و خود موتور می‌باشد. پورت‌های ورودی و خروجی سیلندر موتور به‌صورت هندسی با لوله‌ها مدل‌سازی شدند.

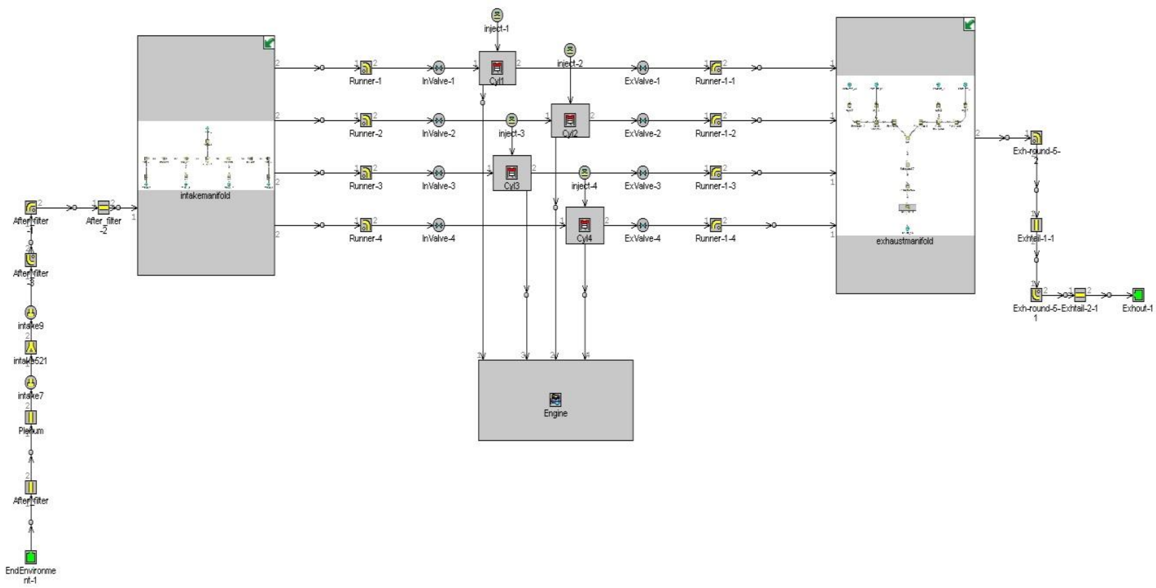
موتور مورد استفاده در این آزمایش از نوع موتور چهار زمانه چهار سیلندر تزریق مستقیم پرکینز (Perkins 4-108v) واقع در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره) نوشهر

انتخاب شد. مشخصات و مدل شبیه‌سازی موتور چهار سیلندر بیان شده در تمامی کورس‌های موتور همراه با سیستم ورودی هوا و خروجی اگزوز با استفاده از نرم‌افزار GT-Power به‌ترتیب در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات فنی موتور دیزل

Table 2- Technical specifications of diesel engine

مشخصات **Specifications**	مقدار **Value**	واحد **Unit**
تعداد سیلندر Cylinders No.	4	-
قطر پیستون Bore	88.9	mm
کورس پیستون Stroke	79.5	
حجم موتور Displacement	1.8	Lit
نسبت تراکم Compression ratio	22:1	-
زمان باز شدن سوپاپ ورودی Inlet valve opening time	24° BTDC	°CA
زمان بسته شدن سوپاپ ورودی Inlet valve closing time	37° BTDC	°CA
زمان باز شدن سوپاپ خروجی Exhaust valve opening time	94° BTDC	°CA
زمان بسته شدن سوپاپ خروجی Exhaust valve closing time	4° BTDC	°CA
حداکثر توان در ۴۰۰۰ دور بر دقیقه Max Power @ 4000 rpm	32	kW
حداکثر گشتاور در ۲۲۰۰ دور بر دقیقه Max Torque @ 2200 rpm	105	m.N



شکل ۲- مدل شبیه‌سازی موتور دیزل چهار سیلندر تزریق مستقیم

Fig.2. Simulation model of four-cylinder, direct-injection, diesel engine

معادلات حاکم

برای مدل‌سازی جریان از معادلات ممنتوم، انرژی و پیوستگی برای حل مدل یک‌بعدی استفاده شد. سیستم کامل به تعدادی حجم در مدل گسسته‌سازی شد. هر حجم نشان‌دهنده تقسیم جریان می‌باشد و هر لوله به حجم‌های تکی یا چندتایی تقسیم شد. حجم‌ها توسط مرزها به هم متصل شد. معادله پیوستگی، انرژی و ممنتوم به‌ترتیب در روابط (۱)، (۲) و (۳) ارائه شده‌اند (Nabi *et al.*, 2019).

$$\frac{dm}{dt} = \sum\nolimits_{boundaries} \dot{m} \qquad (۱)$$

$$\frac{d(me)}{dt} = -p\frac{dV}{dt} + \sum\nolimits_{boundaries}(\dot{m}H) - hA_s(T_{fluid} - T_{Wall}) \qquad (۲)$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} \frac{= dpA + \sum_{boundaries}(\dot{m}u) - 4C_f \frac{pu|u|dxA}{2D} K_p(\frac{1}{2}pu|u|)A}{dx} \qquad (۳)$$

که در آن‌ها $\dot{m}$ شار جرمی مرز به حجم (kg.s^{-1})، m جرم حجمی (kg)، p فشار (Pa)، e انرژی درونی ویژه کل (J)، H آنتالپی ویژه کل (J)، h ضریب انتقال حرارت (W.m^{-2}.K^{-1})، K_p ضریب افت فشار (Pa)، D قطر معادل (m)، dx طول المان جرم در راستای جریان (m)، d_p دیفرانسیل فشار نسبت به dx (Pa.m^{-1})، T_{fluid} دمای سیال (K)، T_{wall} دمای دیواره (K)، V حجم (m^3)، ρ چگالی (kg.m^{-3})، A مساحت سطح مقطع (m^2)، u سرعت مرزی (m.s^{-1}) و C_f ضریب اصطکاک فانینگ می‌باشند.

نرخ سوخت دریافتی از انژکتور را می‌توان به کمک رابطه (۴) محاسبه کرد (Nabi, Rasul, & Gudimetla, 2019).

$$\dot{m}_{Delivery} = \eta_V \rho_{ref} N_{rpm} V_d \left(\frac{F}{A}\right) \frac{6}{(CYL)(Pulse\ Width)} \qquad (۴)$$

که در آن $\dot{m}_{Delivery}$ نرخ سوخت دریافتی از انژکتور (kg.s^{-1})، N_{rpm} سرعت موتور (m.s^{-1})، V_d حجم جابه‌جایی (m^3)، $\frac{F}{A}$ نسبت سوخت به هوا، CYL تعداد سیلندرها، عرض پالس (m)، η_V بازده حجمی (%) و ρ_{ref} چگالی مرجع (kg.m^{-3}) می‌باشند.

برای مدل‌سازی انتقال حرارت در داخل موتور، از مدل تجربی وشنی[1] استفاده شد. در این مدل فرض بر این است که انتقال حرارت تنها از طریق دیواره‌های محفظه احتراق و به‌صورت جابه‌جایی صورت می‌گیرد. شار حرارتی در این مدل به کمک رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Nabi *et al.*, 2019).

$$Q = hA(T_g - T_W) \qquad (۵)$$

که در آن Q شار حرارتی (J)، h ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی گازهای مجاور دیواره (j m^{-2}.°C^{-1})، T_g دمای گازهای داخل اتاق احتراق (°C)، T_W دمای دیواره‌ها (°C) و A مساحت تماس بین گازها و اتاق احتراق (m^2) می‌باشند.

برای پیش‌بینی نرخ سوختن احتراق نسبت به زاویه لنگ از تابع ویب – دیزل پاشش مستقیم مطابق با رابطه (۶) استفاده شد (Nabi *et al.*, 2019).

$$combustion\ (\theta) = (CE)\left[1 - e^{-(WC)(\theta - SOC)^{(E+1)}}\right] \qquad (۶)$$

که در آن CE کسر سوخت سوزانده شده (g)، WC ثابت ویب، SOC شروع احتراق (درجه میل‌لنگ) و θ زاویه لنگ لحظه‌ای (°) می‌باشد.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل

در این بخش، نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از آزمون عملکرد و آلایندگی موتور در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی جهت اعتباربخشی مدل توسعه‌یافته مورد استفاده قرار گرفت. بدین صورت که نتیجه آزمایشگاهی گشتاور برای اهداف اعتبارسنجی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده و حداکثر میزان خطا به کمک رابطه (۷) محاسبه شد (Ahmadipour *et al.*, 2021).

$$\text{خطا} = \frac{\text{مقدار تجربی} - \text{مقدار شبیه‌سازی}}{\text{مقدار تجربی}} \times 100 \qquad (۷)$$

شکل ۳ داده‌های آزمایشگاهی گشتاور سوخت دیزل را نسبت به سرعت موتور برای اعتبارسنجی با داده‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳ و رابطه (۷) می‌توان دریافت که درصد خطا بین داده‌ها در حداقل و حداکثر سرعت موتور به‌ترتیب برابر ۳/۳۳ درصد و ۵/۷۴ درصد می‌باشد. در نتیجه توافق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که برای اعتبارسنجی مدل قابل قبول می‌باشد.

ارزیابی نتایج عملکردی موتور

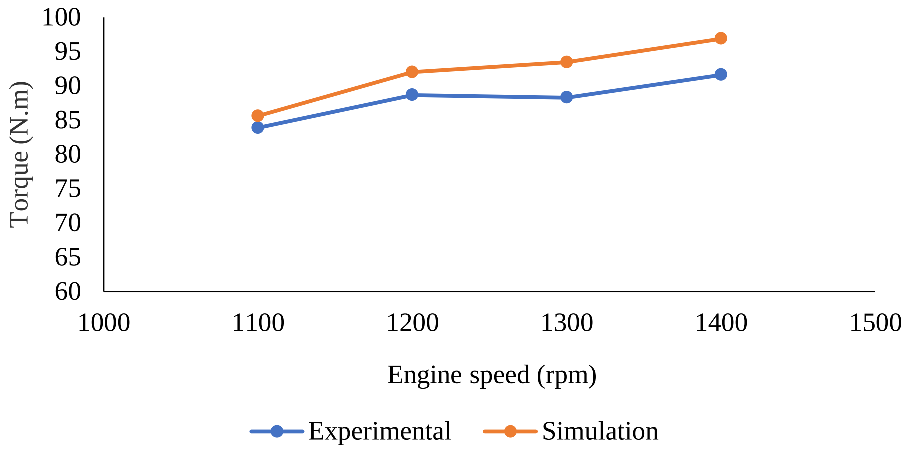
گشتاور موتور

در شکل ۴، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.

با توجه به شکل ۴ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، گشتاور در سرعت ۱۴۰۰ rpm به مقدار مطلوب خود می‌رسد. (برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور مقدار گشتاور افزایش می‌یابد). در این سرعت بیشترین مقدار گشتاور

1- Woschni

موتور به میزان ۹۷/۷۵ N.m و برای مخلوط سوخت B10 مشاهده شد. همچنین کمترین مقدار گشتاور به میزان ۸۳/۸۸ N.m در سرعت ۱۱۰۰ rpm و برای سوخت B0 می‌باشد.



شکل ۳– مقایسه داده تجربی و شبیه‌سازی گشتاور موتور برای سوخت دیزل بر حسب سرعت موتور

Fig.3. Comparison of experimental and simulations data engine torque for diesel fuel According to engine speed

در همه سرعت‌های آزمایش، گشتاور موتور برای مخلوط‌های بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص به دلیل اکسیژن موجود در سوخت بیودیزل و بهبود احتراق افزایش یافت که این افزایش بیشتر در سرعت پایین موتور (۱۱۰۰ rpm) می‌باشد (Bavafa, Tabasizadeh, Farzad, Ghobadian, & Eshghi, 2016). میانگین این افزایش در نمونه‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۴/۱۱ درصد و ۴/۴۵ درصد نسبت به سوخت دیزل به دلیل اکسیژن سوخت بیودیزل می‌باشد (Bavafa *et al.*, 2016). محققان دیگری افزایش گشتاور در اثر افزایش سرعت موتور و افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل را نیز گزارش نموده‌اند (Iliev & Hadjiev, 2012; Nabi & Rasul, 2019; Bavafa *et al.*, 2016).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور موتور به‌ترتیب در سرعت‌های ۱۴۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm می‌باشد. دلیل حداکثر میزان خطا در سرعت‌های بالای موتور می‌تواند به دلیل استهلاک موتور باشد (Haji Heydari & Hatefi Asl, 2019).

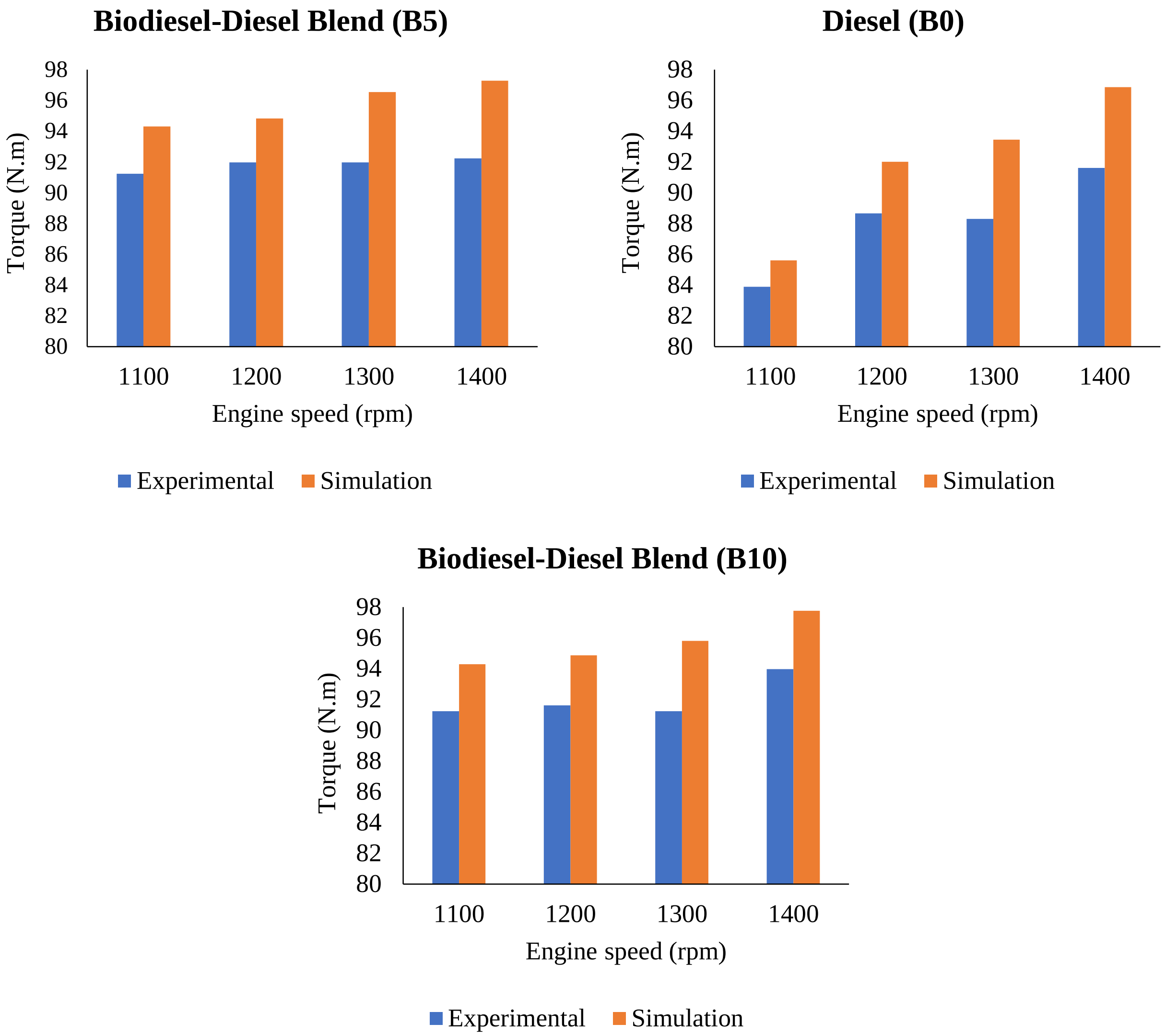
برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور به‌ترتیب در سرعت‌های rpm ۱۴۰۰ و ۱۱۰۰ rpm مشاهده شد.

به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد حداکثر میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور موتور برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۵/۷ درصد، ۵/۳ درصد و ۶/۳ درصد می‌باشد. همچنین حداقل میزان این خطا برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب برابر ۲/۱ درصد، ۳/۴ درصد و ۳/۳ درصد می‌باشد.

مصرف سوخت ویژه موتور

مصرف سوخت ویژه معیاری برای راندمان سوخت هر محرک اصلی است که سوخت را می‌سوزاند و تولید توان می‌کند. به طور معمول مصرف سوخت ویژه برای مقایسه راندمان موتورهای احتراق داخلی نسبت به خروجی میل‌لنگ استفاده می‌شود (Kinnal, Sujaykumar, D'costa, & Girishkumar, 2018).

در شکل ۵، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.



شکل ٤– تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل

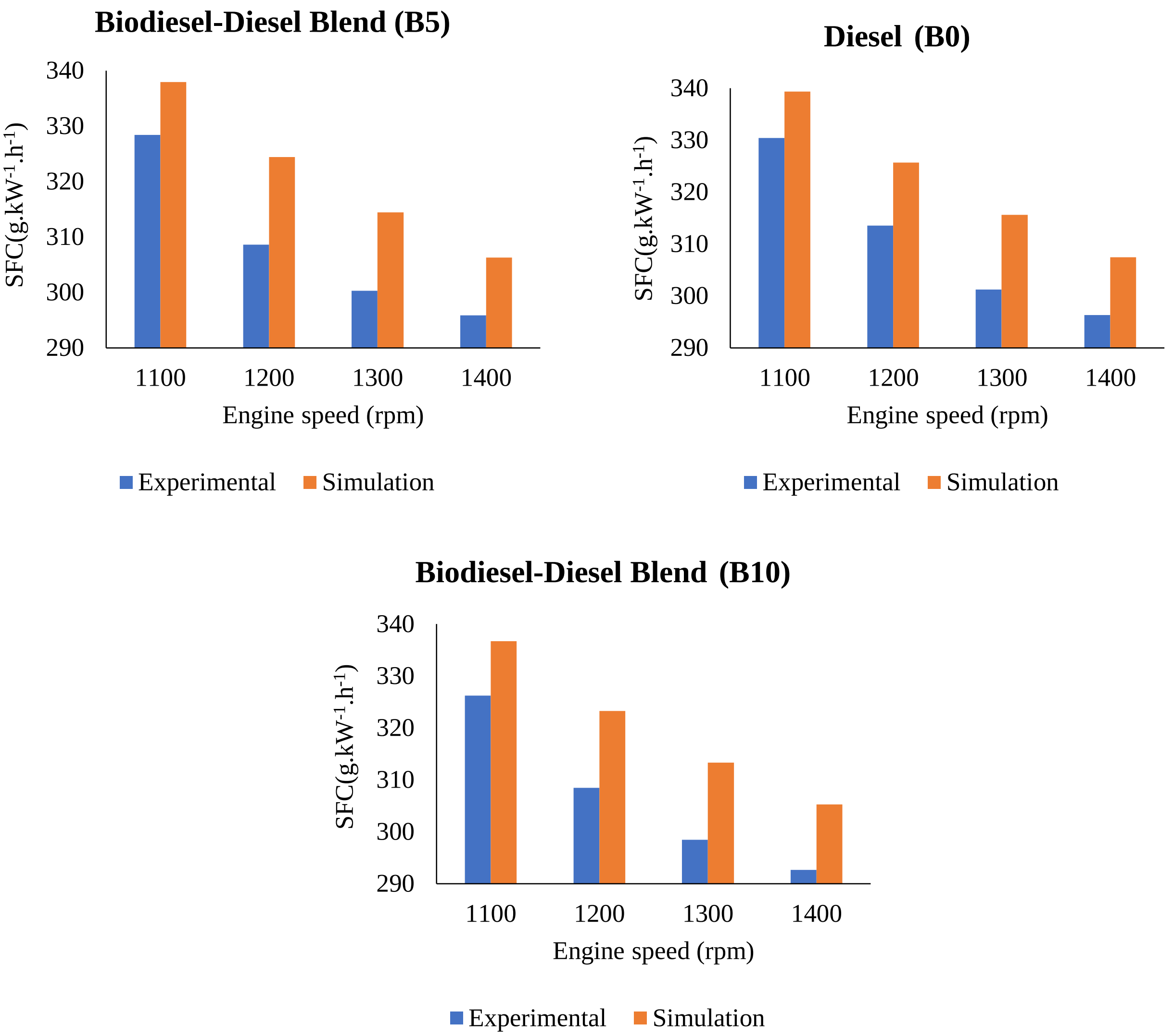
Fig.4. Experimental and simulations torque variations versus engine speed for biodiesel- diesel fuel blends

با توجه بـه شـکل ۵ مـی‌تـوان مشـاهده کـرد کـه بـرای همـه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور مصـرف سـوخت ویـژه موتور به دلیل افزایش بازده حجمی و کاهش تلفات حرارتـی کـاهش می‌یابد (Sen, 2019). در سرعت ۱۴۰۰ rpm، کمترین مقدار مصـرف سوخت ویژه به میزان ۳۰۵/۲۵ g.kW^{-1}.h^{-1} و برای مخلـوط سـوخت B10 مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار مصرف سـوخت ویـژه بـه میزان ۳۳۹/۳۳ g.kW^{-1}.h^{-1} در سـرعت ۱۱۰۰ rpm و بـرای سـوخت B0 می‌باشد.

در همه سرعت‌های آزمایش، با افزایش مقـدار سـوخت بیـودیزل مخلوط نسبت به دیزل خالص مصـرف سـوخت ویـژه موتـور کـاهش می‌یابد. افزایش گشتاور و توان موتـور بـه دلیـل اکسـیژن موجـود در سوخت بیودیزل می‌تواند در کاهش مصرف سوخت ویژه موتـور مـوثر باشـد (Armas, Yehliu, & Boehman, 2010; Nguyen, Dan, & Asano, 2015). میـزان مصـرف سـوخت ویـژه در سـرعت rpm ۱۴۰۰، برای مخلوط‌های B5 و B10 به‌ترتیـب ۴/۱۱ درصـد و ۴/۴۵ درصد نسبت به سوخت دیزل کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از برخی مطالعات نیز بـه نتیجـه حاصـل از مطالعـه حاضر نزدیـک مـی‌باشـد (Metin, Atilla, Ozer, & FatihSahin, 2010; Ravikumar, Sujaykumar, Divakar, & Basavaraj, 2017; Khoobbakht, 2019).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بـین نتـایج آزمایشـگاهی و شـبیه‌سـازی مصـرف سـوخت ویـژه بـه‌ترتیـب در سرعت‌های ۱۳۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل

Fig.5. Experimental and simulations specific fuel consumption variations versus engine speed for biodiesel -diesel fuel blends

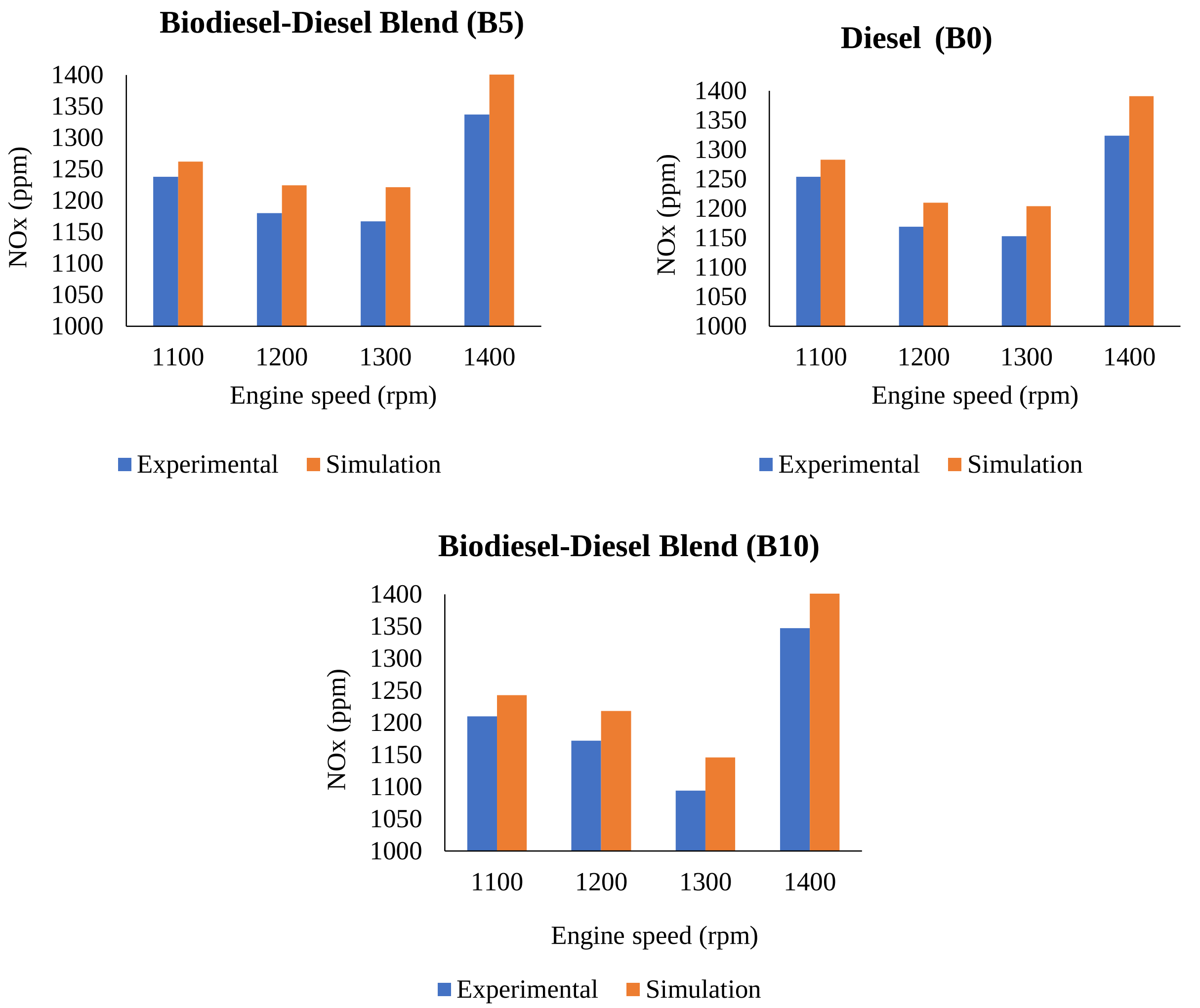
در نتیجه با توجه به نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه موتور برای سوخت دیزل خالص (B0)، حداکثر میزان خطا برابر با ۴/۸ درصد و حداقل میزان خطا برابر با ۲/۹ درصد می‌باشد. همچنین برای مخلوط‌های B5 و B10، حداکثر میزان خطا برابر با ۴/۳۴ درصد و ۴/۵ درصد و حداقل میزان خطا برابر با ۲/۷ درصد و ۳/۲ درصد می‌باشد.

ارزیابی نتایج آلایندگی موتور

آلاینده اکسید نیتروژن

تنها نیتروژن اکسیدی که می‌تواند در دمای احتراق موتور تشکیل گردد، نیتروژن مونوکسید (NO) می‌باشد. این ترکیب می‌تواند در هنگام خروج از اگزوز به نیتروژن دی‌اکسید (NO_2) تبدیل شود. با این حال، با کاهش مداوم دمای احتراق در محفظه احتراق، NO_2 شروع به تجزیه به NO و O_2 می‌نماید. در نتیجه، آلاینده NOx عمدتاً به‌صورت NO و NO_2 آزاد می‌گردد که سمی‌تر از NO می‌باشد (Noorollahi, Azadbakht, & Ghobadian, 2018).

در شکل ۶، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NOx نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.



شکل ٦- تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NOx نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل

Fig.6. Experimental and simulations NOx emission variations versus engine speed for biodiesel -diesel fuel blends

با توجه به شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، آلاینده NOx در سرعت ۱۳۰۰ rpm به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین در سرعت ۱۳۰۰ rpm کمترین مقدار آلاینده NOx به میزان ۱۰۹۴/۲۴ ppm برای مخلوط سوخت B10 حاصل شد.

برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور از ۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ rpm مقدار آلاینده NOx کاهش و سپس افزایش می‌یابد. دلیل افزایش آلاینده NOx در سرعت ۱۴۰۰rpm را احتمالاً می‌توان به افزایش دما و فشار محفظه احتراق به دلیل افزایش راندمان حجمی موتور نسبت داد. نتیجه بالارفتن فشار حداکثر باعث افزایش آلاینده NOx می‌شود. در سرعت‌های پایین موتور به دلیل کاهش راندمان حجمی موتور و در نهایت کاهش دمای محفظه احتراق آلاینده NOx کاهش می‌یابد (Aydin & Bayindir, 2010; Tan, Zhi-yuan, Di-ming, & Zhi-jun, 2012).

در حداکثر سرعت موتور، با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل، آلاینده NOx ۱/۸ درصد افزایش می‌یابد. حضور اکسیژن در ساختار سوخت در شرایط دمای بالای احتراق نقش قابل‌توجهی در تشکیل آلاینده NOx دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اکسیژن مخلوط بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص سبب افزایش ناچیز این آلاینده می‌شود (Fu *et al.*, 2017).

از طرفی دیگر در حداقل سرعت موتور، مقدار آلاینده NOx با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل ۳/۱۱ درصد کاهش یافت. احتمالاً کاهش اکسیژن در محفظه احتراق به دلیل کاهش راندمان حجمی موتور و کاهش ارزش حرارتی

مخلوط‌های بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص سبب کاهش آلاینده NOx شده است (Osman Emiroğlua, Keskinb, & Şenb, 2018). نتایج این مطالعه با نتایج به‌دست آمده از تحقیقات محققان دیگر مطابقت داشت (Nguyen *et al.*, 2015; Vallinayagam *et al.*, 2014).

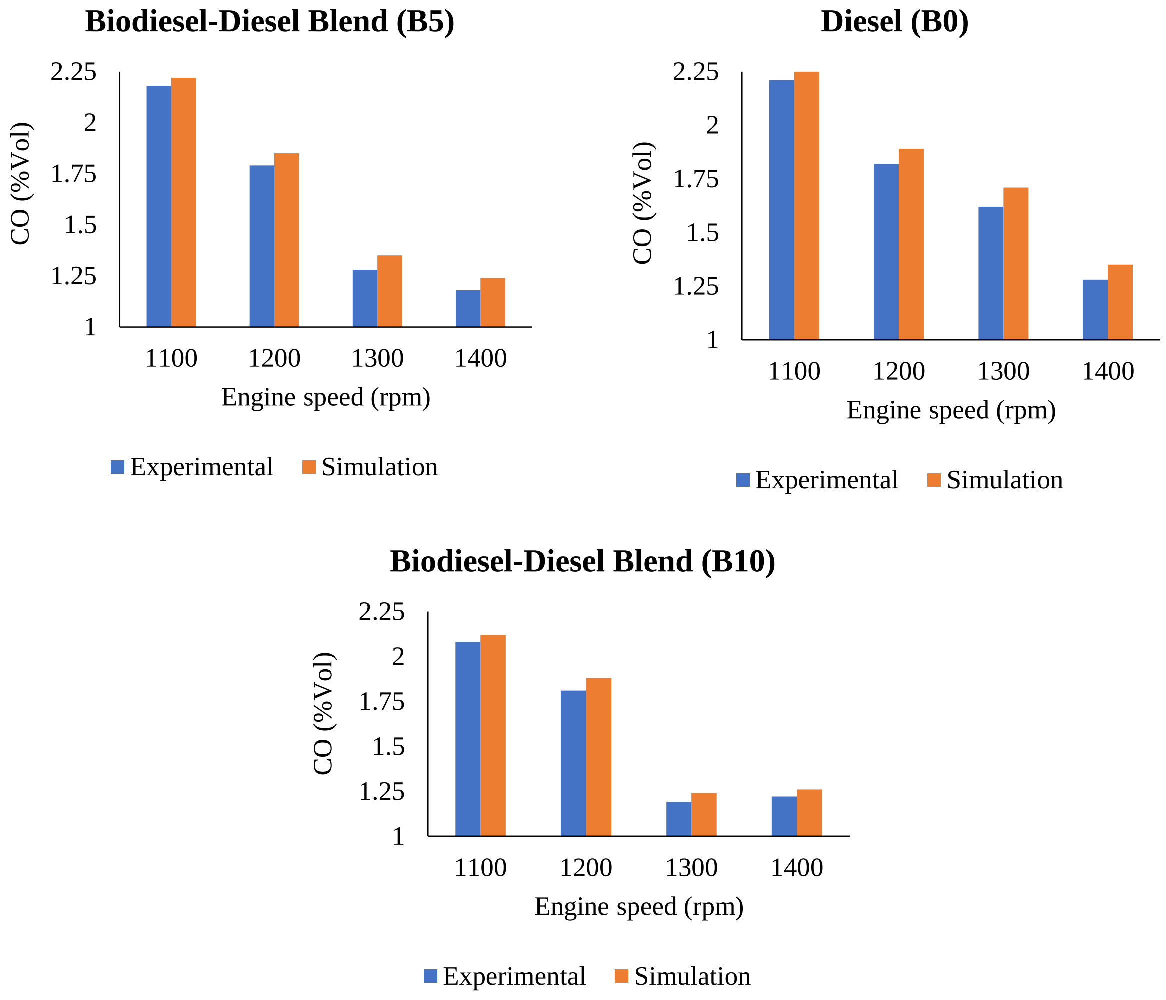
برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NOx موتور به‌ترتیب در سرعت‌های ۱۴۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm می‌باشد. دلیل حداکثر میزان خطا در سرعت‌های بالای موتور نیز می‌تواند به دلیل استهلاک موتور باشد (Haji Heydari & Hatefi Asl, 2019).

در نتیجه حداکثر میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده NOx موتور برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۵/۱ درصد، ۵/۶ درصد و ۵/۵ درصد می‌باشد. همچنین حداقل میزان این خطا برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب برابر ۱/۹ درصد، ۲/۷ درصد و ۲/۳ درصد می‌باشد.

آلاینده مونوکسید کربن

آلاینده مونوکسیدکربن (CO) یک گاز بی‌رنگ و بدون بو است که حتی غلظت بسیار کم آن برای انسان و حیوانات خطرناک است. وقتی مقدار کمی اکسیژن در فرآیند سوزاندن مواد آلی وجود داشته باشد، CO تولید می‌شود. در شرایط احتراق اکسیژن موجود در ساختار مولکولی سوخت بیودیزل باعث کاهش قابل‌توجهی در آلاینده CO می‌شود (Hasan *et al.*, 2015).

در شکل ۷، تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO موتور نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل تحت بار کامل مقایسه شده است.



شکل ۷– تغییرات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO نسبت به سرعت موتور برای مخلوط‌های سوخت دیزل و بیودیزل

Fig.7. Experimental and simulations CO emission variations versus engine speed for biodiesel -diesel fuel blends

با توجه به شکل۷ می‌توان مشاهده کرد که برای همه سوخت‌های آزمایش، با افزایش سرعت موتور مقدار آلاینده CO کاهش می‌یابد، زیرا با افزایش سرعت راندمان حجمی موتور افزایش می‌یابد. در نتیجه این افزایش، باعث بهبود احتراق و کاهش آلاینده CO می‌شود (Sen, 2019).

از طرفی دیگر در همه سرعت‌های آزمایش، با افزایش مقدار سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به دیزل خالص، میزان آلاینده CO به دلیل اکسیژن موجود در سوخت بیودیزل کاهش می‌یابد (Dubey & Gupta, 2016; Noorollahi *et al.*, 2018). همچنین بیشترین کاهش آلاینده CO برای مخلوط‌های بیودیزل و دیزل نسبت به دیزل خالص در سرعت ۱۳۰۰rpm مشاهده شد. میزان این کاهش برای نمونه‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۲۶/۶۷ درصد و ۳۷/۱۱ درصد نسبت به سوخت دیزل می‌باشد.

محققان دیگری، آلاینده CO کمتر در اثر افزایش سرعت موتور و افزایش سوخت بیودیزل مخلوط نسبت به سوخت دیزل را نیز گزارش نموده‌اند (Hasan *et al.*, 2015; Noorollahi *et al.*, 2018).

برای همه سوخت‌های آزمایش، حداکثر و حداقل خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO موتور به‌ترتیب در سرعت‌های ۱۳۰۰ rpm و ۱۱۰۰ rpm مشاهده شد. به‌طور کلی نتایج این مطالعه نشان داد حداکثر میزان خطا بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آلاینده CO موتور برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب ۵/۶ درصد، ۵/۵ درصد و ۴/۲ درصد می‌باشد. همچنین حداقل میزان این خطا برای سوخت دیزل خالص (B0) و مخلوط‌های سوخت B5 و B10 به‌ترتیب برابر ۱/۸ درصد، ۱/۹۲ درصد و ۲/۲ درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری

یک مدل ترمودینامیکی برای تجزیه و تحلیل گشتاور، مصرف سوخت ویژه، آلاینده‌های NOx و CO مورد توسعه قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی پارامترهای عملکرد و آلایندگی یک موتور دیزل چهار سیلندر تزریق مستقیم تحت بار کامل با استفاده از مخلوط‌های مختلف سوخت جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی اعتبارسنجی شد. نتایج اصلی این مطالعه عبارتند از:

۱- اعتبارسنجی موتور نشان می‌دهد که بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در تمام سرعت‌های موتور به‌خصوص برای حداقل گشتاور مربوطه توافق خوبی وجود دارد.

۲- با افزایش سرعت موتور مقدار گشتاور افزایش یافته و با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط نسبت به سوخت دیزل خالص، مقدار گشتاور موتور به دلیل بهبود احتراق افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش سرعت موتور، مصرف سوخت ویژه کاهش یافته و با افزایش درصد سوخت بیودیزل در مخلوط نسبت به سوخت دیزل خالص، مقدار مصرف سوخت ویژه موتور به دلیل افزایش توان کاهش می‌یابد.

۴- مخلوط سوخت B10 در سرعت ۱۳۰۰ rpm مطلوب‌ترین سوخت از نظر کاهش آلایندگی NOx و CO به‌ترتیب با ۴/۷۲ درصد و ۳۷/۱۱ درصد کاهش نسبت به سوخت دیزل می‌باشد.

۵- حداکثر خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی گشتاور و آلاینده NOx موتور به‌ترتیب در حدود ۶/۳ و ۵/۶ درصد در سرعت ۱۴۰۰ rpm می‌باشد.

۶- حداکثر خطای نسبی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مصرف سوخت ویژه و آلاینده CO موتور به‌ترتیب در حدود ۴/۸ و ۵/۶ درصد در سرعت ۱۳۰۰ rpm می‌باشد.

۷- نتایج نشان داد که مخلوط B10 به‌عنوان بهترین سوخت از نظر عملکرد و آلایندگی موتور دیزل می‌باشد و همچنین مدل توسعه‌یافته می‌تواند برای پیش‌بینی ویژگی‌های عملکرد و گازهای خروجی از موتور دیزل استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که فرصت تصویب و انجام این طرح پژوهشی با کد طرح ۰۲-۱۳۹۹-۰۲ را فراهم نمودند، تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

References

1. Ahmadipour, S., Aghkhani, M. H., & Zareei, J. (2021). The Effect of Compression Ratio and Alternative Fuels on the Performance of Turbocharged Diesel Engine by GT-POWER Software. *Journal of Agricultural Machinery, 11*, 199-212. (in Persian with English abstract). https://doi.org/ 10.22067/JAM.V11I2.71613.
2. Al-Dawody, M. F. (2017). Theoretical study for the influence of biodiesel addition on the combustion, performance, and emissions parameters of single cylinder diesel engine. *Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences, 25*(5), 57-69.
3. Al-Dawody, M. F., Jazie, A., & Abdulkadhim Abbas, H. (2019). Experimental and simulation study for the effect of waste cooking oil methyl ester blended with diesel fuel on the performance and emissions of diesel engine.

Alexandria Engineering Journal, *58*, 9-17. https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.05.009.
4. Armas, O., Yehliu, K., & Boehman, A. L. (2010). Effect of alternative fuels on exhaust emissions during diesel engine operation with matched combustion phasing. *Fuel*, *89*, 438-456. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.022.
5. Aydin, H., & Bayindir, H. 2010. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renewable Energy*, *35*, 588-592. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.009.
6. Bavafa, M., Tabasizadeh, M., Farzad, A., Ghobadian, B., & Eshghi, H. (2016). Effect of poultry fat oil biodiesel on tractor engine performance. *Journal of Agricultural Machinery*, *6*, 14-24. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAM.V6I1.28488.
7. Dubey, P., & Gupta, R. (2016). Study of the performance and emission characteristics for a dual fuel powered single cylinder diesel engine. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *13*, 3373-3388. https://doi.org/10.15282/ijame.13.2.2016.7.0279.
8. Fu, J., Shu, J., Zhou, F., Liu, J., Xu, Z., & Zeng, D. (2017). Experimental investigation on the effects of compression ratio on in-cylinder combustion process and performance improvement of liquefied methane engine. *Applied Thermal Engineering*, *113*, 1208-1218. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.048.
9. Haji Heydari, M., & Hatefi Asl, N. (2019). Simulation and numerical analysis of the effect of biodiesel fuel and low rate EG on performance and pollution in marine diesel engine. *Journal of Energy Conversion*, *6*, 7-12.
10. Hasan, M. M., Rahman, M. M., & Kadirgama, K. (2015). A review on homogeneous charge compression ignition engine performance using biodiesel-diesel blend as a fuel. International. *Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *11*, 2199-2211. https://10.15282/ijame.11.2015.3.0184.
11. Iliev, S., & Hadjiev, K. (2012). Analysis of engine speed effect on the four- stroke gdi engine performance. *Proceedings in Manufacturing Systems*, *7*(4).
12. Khoobbakht, G. (2019). Evaluation of the Specific Fuel Costs for Combination of Diesel Fuel- Biodiesel-Bioethanol in a Diesel Engine. *Journal of Agricultural Machinery*, *9*, 358-397. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.v9i2.64690.
13. Kinnal, N., Sujaykumar, G., D’costa, S. W., & Girishkumar, G. S. (2018). Investigation on Performance of Diesel Engine by Using Waste Chicken Fat Biodiesel. *Materials Science and Engineering*, *376*, 012012. https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012012.
14. Menacer, B., & Bouchetara, M. (2014). Parametric study of the performance of a turbocharged compression ignition engine. *Simulation*, *90*(12), 1375-1384. https://doi.org/10.1177/0037549714557046.
15. Metin, G., Atilla, K., Ozer, C., & FatihSahin, C. (2010). Biodiesel production from waste chicken fat-based source and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*, *35*, 637-643. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.011.
16. Miri, S. M. R., Mousavi Seyedi, S. R., & Ghobadian, B. (2017). Effects of biodiesel fuel synthesized from non-edible rapeseed oil on performance and emission variables of diesel engines. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 3798-3808. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.082.
17. Nabi, M. N., & Rasul, M. G. (2019). One-Dimensional Thermodynamic Model Development for Engine Performance, Combustion and Emissions Analysis Using Diesel and Two Paraffin Fuels. *Energy Procedia*, *156*, 259-265. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.139.
18. Nabi, M. N., Rasul, M. G., & Gudimetla, P. (2019). Modelling and simulation of performance and combustion characteristics of diesel engine. *Energy Procedia*, *160*, 662-669. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.219.
19. Nguyen, K. B., Dan, T., & Asano, I. (2015). Effect of double injection on combustion, performance and emissions of Jatropha water emulsion fueled direct-injection diesel engine. *Energy*, *80*, 746-755. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.033.
20. Noorollahi, Y., Azadbakht, M., & Ghobadian, B. (2018). The effect of different diesterol (diesel biodiesel ethanol) blends on small air-cooled diesel engine performance and its exhaust gases. *Energy*, *142*, 196-200. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.024.
21. Osman Emiroğlua, A., Keskinb, A., & Şenb, M. (2018). Experimental investigation of the effects of turkey rendering fat biodiesel on combustion, performance and exhaust emissions of a diesel engine. *Fuel*, *216*, 266-273. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.026.
22. Rahman, M. M., Mohammed, M. K., & Bakar, R. A. (2009). *Effect of Air Fuel Ratio on Engine Performance of Single Cylinder Port Injection Hydrogen Fueled Engine: A Numerical Study*. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol II IMECS 2009, March 18-20, 2009, Hong Kong, 2009.
23. Ravikumar, R., Sujaykumar, G., Divakar, S. H., & Basavaraj, K. (2017). Investigation of Effect of Chicken Biodiesel Blended Diesel on Engine Performance. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *3*, 2454-8006.
24. Saravanana, A., Muruganb, M., Sreenivasa Reddy, M. M., & Satyajeet, P. (2020). Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua. *Fuel*, *263*, 116751. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116751.

25. Sen, A. (2019). The influence of canola oil biodiesel on performance, combustion characteristics and exhaust emissions of a small diesel engine. *Sakarya University Journal of Science, 23*, 121-128. https://doi.org/10.16984/saufenbilder.472112.
26. Tan, P. Q., Zhi-yuan, H., Di-ming, L., & Zhi-jun, L. (2012). Exhaust emissions from a light-duty diesel engine with Jatropha biodiesel fuel. *Energy*, *39*, 356-362. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.002.
27. Vallinayagam, R., Vedharaj, S., Yang, W., Lee, P., Chua, K., & Chou, S. (2014). Pine oil-biodiesel blends: A double biofuel strategy to completely eliminate the use of diesel in a diesel engine. *Applied Energy*, *130*, 466-73. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.025.